

نمذجة الحقول الكهرومغناطيسية ومحاكاتها في المحركات التحريضية ثلاثية الطور باستخدام الحزمة البرمجية ANSYS

الدكتور محمد موسى*

الدكتور عزت حسن**

صفاء الأحمد***

(تاريخ الإيداع 12 / 12 / 2013. قُبل للنشر في 31 / 12 / 2013)

▽ ملخص ▽

تعد دراسة الحالة الكهرومغناطيسية في الآلات والأجهزة الكهربائية بمختلف مكوناتها أمراً بالغ الأهمية، وخاصة في مجال التصميم والاستثمار والأداء الأمثل. ويستخدم لتحقيق ذلك العديد من الطرائق التي تتفاوت بدرجة دقتها وسهولة إمكانياتها.

يهدف هذا البحث إلى دراسة الحقول الكهرومغناطيسية في المحركات التحريضية ثلاثية الطور من خلال التقنيات الرقمية لتحليلها، باستخدام البيئات البرمجية المتقدمة لإيجاد محددات الحقول ومعاملاتها وتوزيعها في هذه الآلات، لأن هذه الحقول تشكل المبدأ الأساسي في عمل هذه المحركات.

استخدمت في هذا البحث طريقة العناصر المنتهية بمساعدة الحاسوب لحل المعادلات المغناطيسية المعقدة انطلاقاً من معادلات ماكسويل.

تم تحقيق الدراسة بمحاكاة الحقل المغناطيسي في الآلة التحريضية بمساعدة الحزمة البرمجية ANSYS. من خلال النتائج العملية للنمذجة تبين لنا إمكانية دراسة أداء الآلة التحريضية انطلاقاً من تحديد توزيع الحقول الكهرومغناطيسية في الأجزاء المختلفة منها بهدف الحصول على التصميم الأمثل للآلة .

الكلمات المفتاحية: طريقة العناصر المنتهية، المحركات التحريضية، الحزمة البرمجية ANSYS.

* أستاذ - كلية الهندسة الكهربائية والميكانيكية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

** أستاذ - كلية الهندسة الكهربائية والميكانيكية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

*** طالبة دكتوراه - كلية الهندسة الكهربائية والميكانيكية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

Modeling and Simulation of Electromagnetic Fields in Three-Phase Induction Motors Using ANSYS Software

Dr. Muhammad Musa^{*}
Dr. Izzat Hasan^{**}
Safaa al-Ahmad^{***}

(Received 12 / 12 / 2013. Accepted 31 / 12 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

The study of electromagnetism in electrical machines is critical, especially in the field of design, investment and optimal performance. To achieve this, there are many ways in which varying degrees of accuracy . The main aim of this piece of research is to study electromagnetic fields distribution in 3ph-induction machines using computational numerical methods and proper software, because these fields form the basic principle in machine 's work. It has been used the finite element method aided computer to solve magnetic equations (Maxwell equations).

The simulation of magnetic field in induction machine performed by ANSYS-software. The paper shows technique for finding the electromagnetic fields distribution in all parts inside 3ph-induction machine to get optimal design.

Keywords: Finite Element Method (FEM), Induction Motors(IM), Software ANSYS.

* Professor; Faculty of Electrical & Mechanical Engineering; University of Damascus; Damascus: Syria.

** Professor; Faculty of Electrical & Mechanical Engineering; University of Damascus; Damascus: Syria.

*** Postgraduate Student; Faculty of Electrical & Mechanical Engineering; University of Damascus; Damascus: Syria.

مقدمة:

تعد المحركات التحريضية في عصرنا الحالي من أكثر أنواع الآلات الكهربائية انتشاراً واستخداماً، وبشكل خاص في التطبيقات أو المنشآت الصناعية. فهي تتطلب حوالي 50% من الطاقة الكهربائية المتولدة في محطات توليد الطاقة الكهربائية، لا بل أكثر من ذلك في البلدان المتطورة صناعياً. وتزداد الحاجة إلى هذه المحركات بشكل دائم ومستمر.

لاقت المحركات التحريضية هذا الانتشار الواسع بفضل البساطة في التصميم وسعرها المنخفض بالمقارنة مع المحركات الأخرى (المتواكئة أو المستمرة) والمتانة والموثوقية العالية التي تتمتع بها، وقدرتها على الإقلاع الذاتي. تتوافر هذه المحركات باستطاعات وحجوم مختلفة (من استطاعة أقل من كيلو وات وحتى عدة آلاف من الكيلو واطات)، وهي لا تحتاج إلى وسائل إضافية من أجل التهييج سوى خط التيار المتناوب الذي تغذى منه (لا تحتاج إلى منبع DC للتهييج كما هو في الآلات المتواكئة).

تمتاز هذه المحركات بمردودها الجيد حيث يمكن أن يصل إلى حدود 95%. يستخدم المحرك التحريضي وبشكل خاص المحرك ذو القفص السنجابي بشكل واسع كمنبع للطاقة الميكانيكية المغذية لأنظمة الطاقة المتناوبة، كما أن الحساسية المنخفضة للاضطرابات التي تحدث في أثناء التشغيل تجعل المحرك التحريضي ذا الدائر المقصور (القفص السنجابي) الخيار الأول في التطبيقات.

تأخذ التكلفة والمردود والموثوقية أهمية قصوى في السوق التنافسية، لذلك فإنه من الضروري أن تتوفر التصاميم لتقابل المتطلبات التي تتسع يوماً بعد آخر [2,1].

تتضمن عملية التصميم للآلة الكهربائية حل العديد من المسائل الهندسية المعقدة والمتربطة بعضها مع بعض، إذ يمكن الحصول من خلال ذلك على العديد من الحلول المقبولة، لذلك يمكن القول إن عملية تصميم الآلة الكهربائية تشكل مسألة متعددة الحلول. وعند التصميم يجب معالجة مجموعة من المسائل الكهرومغناطيسية والحرارية والميكانيكية المترابطة، مما يقتضي تكرار الحلول عدة مرات قبل الوصول إلى حل قابل للتطبيق يحقق غالبية المواصفات المطلوبة.

بدأ استخدام طريقة العناصر المنتهية منذ سنوات عديدة في تصميم الآلات، وازدادت أهميتها في الآونة الأخيرة، وخاصة بعد ظهور الحواسيب السريعة الحالية، تتيح طريقة العناصر المنتهية تحديد الصورة الكهرومغناطيسية التفصيلية الشاملة لكل جزء مرغوب من الآلة المدروسة، إضافة إلى تصور متكامل عن الحالة المدروسة. وتساعد النتائج في اتخاذ الإجراءات الكفيلة بتشغيل الآلة ضمن الشروط الفنية والاقتصادية المثلى.

كما يمكن أيضاً أن يقدم تطبيق الطريقة في مرحلة التصميم للآلات والأجهزة الكهربائية فوائد كبيرة في مراقبة مواصفات الآلة المصممة وخصائصها في كل مرحلة من مراحل التصميم وإجراء التعديلات المناسبة على النموذج المصمم للوصول إلى المواصفات المرغوبة [5,4,3].

أهمية البحث وأهدافه:

تعد نمذجة الحقول الكهرومغناطيسية في التجهيزات والآلات الكهربائية ومنها الآلات التحريضية أمراً بالغ الأهمية للوصول إلى التصميم الأمثل للآلة، وذلك نظراً لأهميته في الاستثمار وتحقيق الجدوى الاقتصادية، و من ناحية أخرى تشكل الآلة التحريضية عصب التطبيقات الهندسية والصناعية الحديثة المختلفة، وتساهم النمذجة في

الحصول على الصورة الكهرومغناطيسية الشاملة في كل جزء من أجزاء الآلة المدروسة. مما يتيح تحديد توزيع السيلالة المغناطيسية والتحريض المغناطيسي وشدة الحقل المغناطيسي وكثافة التيار الكهربائي استناداً إلى طريقة العناصر المنتهية بمساعدة حزمة البرمجيات ANSYS .
تهدف هذه الدراسة لتحليل نموذج للمحرك التحريضي ذي القفص السنجابي باستخدام طريقة العناصر المنتهية وبرمجيات ANSYS للحصول على التصميم الأمثل.

طرائق البحث ومواده:

يعتبر تحديد الحقول الكهرومغناطيسية ذا أهمية كبيرة في مجال تصميم الآلات والأجهزة الكهربائية، إذ يتم تحويل هذه المعادلات التفاضلية الجزئية إلى جملة من المعادلات الجبرية تؤمن تحديد توزيع الحقول في شبكة الحل تبعاً للطريقة المستخدمة، وتوجد طريقتان أساسيتان في هذا المجال لحل معادلات الحقول الكهرومغناطيسية، تدعى الأولى بطريقة الفرق المتناهي Finite difference method -FDM والثانية طريقة العناصر المنتهية Finite Element Method -FEM.

تستخدم طريقة الفروقات المتناهية (المحدودة) لحل معادلات ماكسويل، وذلك لأنها تقوم على استبدال الحدود التفاضلية في المعادلة التفاضلية بحدود الفروق المتناهية أو المحدودة ، ليتم بعد ذلك حل المعادلات الجبرية الناتجة. تستند هذه الطريقة إلى تجزئة مجال الحقل المدروس إلى عناصر حدية صغيرة جداً، أي إلى وحدات عنصرية لها الخواص نفسها على شكل مربعات أو مثلثات أو مسدسات أضلاع لتلائم أبعاد الحقل المدروس، ويستخدم منشور تايلور لتحويل الحدود التفاضلية في المعادلة التفاضلية المدروسة إلى حدود الفروقات المتناهية أو المحدودة [7,6] .
تجدر الإشارة إلى صعوبة تطبيق الفرق المتناهي FDM في المسائل ذات الحدود غير المنتظمة والمواد غير المتجانسة الخواص، وأن الطريقة الأنسب هنا استخدام تقنية العناصر المنتهية FEM لتحليل البنى غير المنتظمة والأشكال المعقدة كما هي الحال في الآلات التحريضية ، إذ يمكن تعديل شبكة الحل وتكييفها وتطبيقها بنجاح في هذه الآلات .

تعتمد طريقة العناصر المنتهية على الخطوات الأربع التالية :

- تقطيع مجال الحل إلى عناصر ويتم اختيار المثلثية الشكل غالباً.
- إنشاء معادلات الحقول أو الجهود لكل عنصر .
- يتم تجميع العناصر.
- يتم حل معادلات النظام الناتجة [8,3] .

تزود طريقة FEM بمجال جيد للحل يقسم إلى عناصر مثلثية كما تمت الإشارة آنفاً ، ومن ثم يتم تقريب التابع موضع الاهتمام عن طريق كثير الحدود كالجهد في الكهرباء الساكنة ، وتمتاز هذه الطريقة بأنها تتيح تقدير الجهد وتحديدده، ليس فقط في عقد شبكة الحل بل خلال العنصر أيضاً، بواسطة تابع الشكل أو الاستيفاء ، حيث يتغير تابع الشكل من الواحد في كل عقدة إلى الصفر في العقد المجاورة لها ، تكتب علاقة الجهد V لكل عنصر باستخدام قيم الجهود عند كل عقدة وتابع الشكل وفق العلاقة [7,3]:

$$V_{element} = \sum_{i=1}^3 f_i(x,y) V_{node i}$$

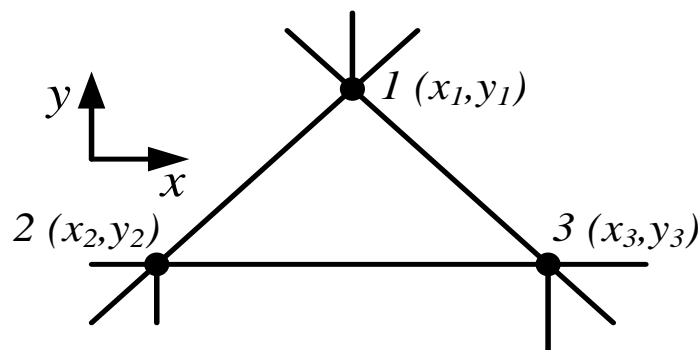
حيث : $f_i(x,y)$ تابع الشكل ويطبق على كل عقدة $V_{node i}$ قيمة الجهد في العقدة i .
 يتم بذلك الحصول على سلسلة معادلات الجهود لكل عنصر ، ومن ثم تشكل مصفوفة المعاملات لترابط العقد فيما بينها ، ليتم الحل بعد ذلك عن طريق مقلوب المصفوفة أو بطريقة التكرار لتحديد الجهد عبر مجال الحل .
 تعد طريقة FEM الأنسب في التطبيقات الكهرومغناطيسية الهندسية لحل المواضيع اللاخطية الكهرومغناطيسية في البنى الهندسية المعقدة كالأجهزة والآلات الكهربائية المختلفة، استناداً للأسباب المذكورة آنفاً فقد تم اختيار طريقة العناصر المنتهية FEM لدراسة المحرك التحريضي بدوائر مقصور، وذلك لإيجاد حلول معادلات ماكسويل للحقل الكهرومغناطيسي ، والتي تتيح الحصول على صورة متكاملة لتوزيع الحقول الكهرومغناطيسية في مختلف أجزاء الآلة كالمسألة المغناطيسية ، وشدة الحقل المغناطيسي ، وخصائص أداء الآلة المختلفة [3] .

تتبع الخطوات التالية لدراسة المحرك التحريضي بقصص سنجابي للدوائر :
 • تجزئة الفراغ الهندسي للآلة إلى مجموعة من المجالات الجزئية أو العناصر المنتهية لشبكة الحل.
 • ربط التوزيع الكموني ضمن كل عنصر منتهٍ بواسطة كثير حدود أو بتابع تجريبي.
 • تجميع العناصر في منطقة الحل.
 • يتم حل جملة المعادلات الخطية الناتجة للكمون.
 يمكن استخدام عناصر منتهية بأشكال مختلفة، لكن الأنسب في ضوء الشكل الهندسي للآلة التحريضية المدروسة العناصر المثلثية لتشكيل شبكة الحل، إذ يمكن للدارس استخدام الأبعاد الهندسية المناسبة لعناصر الشبكة ، وبالتالي عدد العقد فيها. [8,7,6]

تعد العناصر المثلثية من المرتبة الأولى الأكثر شيوعاً في تشكيل شبكة العناصر mesh كما أشرنا سابقاً، ويدعى العنصر بالمثلث ثلاثي الأبعاد ، حيث يفترض أن يتغير الكمون المغناطيسي في العنصر بشكل خطي وفق العلاقة: [8,3]

$$A(X,Y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (1)$$

نأخذ مثلثاً يقع في المستوي x-y ورؤوسه مرقمة ب1,2,3 كما يوضح الشكل (1). ولتكن قيم الكمون المغناطيسي في هذه الرؤوس هي A_1 A_2 A_3 على التوالي.



الشكل (1) عنصر من شبكة العناصر المثلثية

نحسب الكمون في رؤوس المثلث بناءً على العلاقة (1) وفق الآتي :

$$\begin{aligned} A_1 &= a_1 + a_2X_1 + a_3Y_1 \\ A_2 &= a_1 + a_2X_2 + a_3Y_2 \\ A_3 &= a_1 + a_2X_3 + a_3Y_3 \end{aligned} \quad (2)$$

تحتسب الثوابت a_1, a_2, a_3 من جملة المعادلات المستقلة (2) بطريقة مقلوب المصفوفة ، فنحصل على

مايلي :

$$a_1 = \frac{1}{2D} \begin{vmatrix} A_1 & X_1 & Y_1 \\ A_2 & X_2 & Y_2 \\ A_3 & X_3 & Y_3 \end{vmatrix} \quad a_2 = \frac{1}{2D} \begin{vmatrix} 1 & A_1 & Y_1 \\ 1 & A_2 & Y_2 \\ 1 & A_3 & Y_3 \end{vmatrix} \quad a_3 = \frac{1}{2D} \begin{vmatrix} 1 & X_1 & A_1 \\ 1 & X_2 & A_2 \\ 1 & X_3 & A_3 \end{vmatrix}$$

ويكون D :

$$D = \begin{vmatrix} 1 & A_1 & Y_1 \\ 1 & A_2 & Y_2 \\ 1 & A_3 & Y_3 \end{vmatrix}$$

حيث تساوي D مساحة العنصر المثلثي في شبكة الحساب .

يتم تعويض قيم الثوابت a_1, a_2, a_3 في المعادلة (1) وبإجراء الاختصارات اللازمة نحصل على:

$$A(X, Y) = \frac{1}{2D} \sum_{k=1}^3 (P_k + q_k x + r_k y) A_k \quad (3)$$

ترتبط قيم P_k, q_k, r_k في العلاقة السابقة بإحداثيات رؤوس المثلث، وذلك بتعويض الثوابت أعلاه فيكون

لدينا:

$$p_1 = x_2 y_3 - y_2 x_3, q_1 = y_2 - y_3, r_1 = x_3 - x_2$$

$$p_2 = x_3 y_1 - y_3 x_1, q_2 = y_3 - y_1, r_2 = x_1 - x_3$$

$$p_3 = x_1 y_2 - y_1 x_2, q_3 = y_1 - y_2, r_3 = x_2 - x_1$$

نعيد كتابة المعادلة (1) بناءً على ما تقدم فنحصل على:

$$A(x, y) = \alpha_1(x, y) A_1 + \alpha_2(x, y) A_2 + \alpha_3(x, y) A_3$$

أو نكتبها بالشكل التالي :

$$A(X, Y) = \sum_{k=1}^3 \alpha_k(x, y) A_k \quad (4)$$

حيث يكون:

$$\alpha_1(X, Y) = \frac{1}{2D} (P_1 + q_1 x + r_1 y)$$

$$\alpha_2(X, Y) = \frac{1}{2D} (P_2 + q_2 x + r_2 y)$$

$$\alpha_3(X, Y) = \frac{1}{2D} (P_3 + q_3 x + r_3 y)$$

تدعى هذه التتابع بتتابع الشكل (shape functions)، وتأخذ القيم التالية لتتحقق المعادلة (4):

$$\alpha_1(x_1, y_1) = 1, \alpha_2(x_1, y_1) = 0, \alpha_3(x_1, y_1) = 0$$

$$\alpha_1(x_2, y_2) = 0, \alpha_2(x_2, y_2) = 1, \alpha_3(x_2, y_2) = 0$$

$$\alpha_1(x_3, y_3) = 0, \alpha_2(x_3, y_3) = 0, \alpha_3(x_3, y_3) = 1$$

تأخذ المعاملات α_k قيمها بشكل خطي بين الواحد والصفير للعقدة (1) والعقدتين 2 و 3 عند حساب الكمون

المغناطيسي للعقدة (1) ، وهكذا بشكل مشابه تكون قيم α_k تبعا للعقدة التي يتم حساب كمونها المغناطيسي .

تستخدم عدة تقنيات تقريبية لحل المعادلة التفاضلية بطريقة FEM من أهمها [8,3] :

-طريقة المغايرة variational method

-طريقة الأمثال المتبقية weighted residuals

تعتمد معظم برمجيات التحليل العددي الحالية على طريقة العناصر المنتهية نظراً لما تتمتع به من قابلية التطبيق في المسائل التي تمتلك حدوداً غير منتظمة على خلاف الطرائق الأخرى، إذ تأخذ هذه الطريقة بالحسبان الشكل الهندسي للألة والخواص المختلفة للمواد و ظاهرة التشبع المغناطيسي والتيارات الإعصارية وغيرها . تتمتع طريقة العناصر المنتهية بالدقة العالية تبعاً لأبعاد عناصر شبكة الحل وتتيح كما أشرنا سابقاً الحصول على صورة متكاملة لتوزيع الحقول في أجزاء الآلة المدروسة [3].

تعتمد الطرائق العددية على حل معادلات ماكسويل عند الترددات المنخفضة ، لتحديد توزيع الحقل المغناطيسي في الآلات الكهربائية إضافة لعلاقات B كثافة التدفق المغناطيسي و H شدة الحقل المغناطيسي حيث لدينا [8,7]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (8)$$

والعلاقات الأساسية بين أشعة الحقل المختلفة هي:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (9)$$

$$\mathbf{D} = \sigma \mathbf{E} \quad (10)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (11)$$

حيث:

$-D$ كثافة التدفق الكهربائي (C/m^2) . $-E$ شدة الحقل الكهربائي (V/m) . $-J$ كثافة تيار الناقلية.
 B - كثافة التدفق المغناطيسي (T) . H - شدة الحقل المغناطيسي (A/m) . ρ - كثافة الشحنات الحجمية.
 σ - الناقلية الكهربائية (S/m) . ε - النفاذية الكهربائية (F/m) . μ - النفاذية المغناطيسية (H/m) .

تعمل الآلات الكهربائية عند الترددات المنخفضة وبالتالي يتم إهمال معدلات تغير الحقل الكهربائي بالزمن في

المعادلة (5) وتؤخذ كثافة تيار الناقلية \mathbf{J} فقط ، فتؤول المعادلة (5) إلى الشكل التالي:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (12)$$

نعلم أن شعاع كثافة التدفق المغناطيسي (التحريض) \mathbf{B} يرتبط بشعاع الكون المغناطيسي \mathbf{A} من خلال

العلاقة

$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ ، فنحصل بالتعويض في العلاقة (12) على التالي :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (13)$$

تكون كثافة التيار في الحقول المستوية ثنائية البعد ($2D$) وشعاع الكون المغناطيسي بمركبة واحدة منطبقة على المحور Z الذي ينطبق على محور الآلة . يكون شعاع الكون وشعاع كثافة التيار ضمن هذه الشروط كما يلي :

$$\mathbf{A} = (0, 0, A), \mathbf{J} = (0, 0, J)$$

نحصل بإصلاح العلاقة (13) على التالي :

$$-\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (14)$$

ويتبع الحقل المغناطيسي لشعاع الكمون المغناطيسي فيكون لدينا:

$$\mathbf{B} = f \left(\frac{\delta A}{\delta x}, \frac{\delta A}{\delta y}, 0 \right)$$

يتم حل المعادلة التفاضلية الجزئية (14) لإيجاد توزيع الحقل المغناطيسي في المحرك التحريضي باعتبار أن

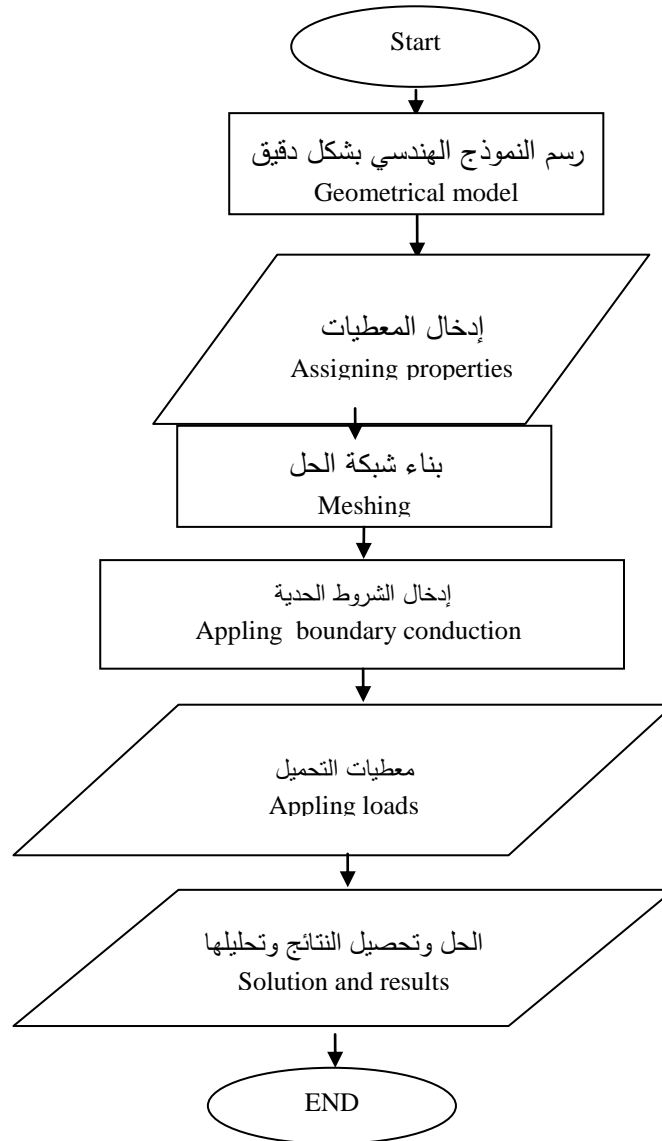
$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B}$$

وتبعية \mathbf{B} لشعاع الكمون \mathbf{A} كما هو معروف . [6,7]

أشرنا سابقاً إلى وجود العديد من البرمجيات المساعدة في تنفيذ الدراسة استناداً إلى طريقة العناصر

المنتية ونذكر أهمها برنامج تسلا TESLA، برنامج COMSOL MULTIPHISICS، برنامج FEMM، برنامج Quick

Field، برنامج MATLAB/PDE ، برنامج ANSYS .



الشكل (2) المخطط الانسيابي للحل

بعد الاطلاع على البرمجيات المستخدمة في طريقة العناصر المنتهية والتعرف إلى إمكانيات كل منها، تم اختيار برمجيات ANSYS لتنفيذ دراسة المحرك التحريضي ثلاثي الطور بقفص سنجابي . يمتاز برنامج ANSYS بالعديد من الإمكانيات لتحليل العناصر المنتهية بدءاً من التحليل الخطي و الساكن و غير الخطي إلى التحليل الديناميكي العابر .

ستركز هذه الدراسة على الحقل المغناطيسي الساكن ثنائي الأبعاد، انطلاقاً من تغذية ملفات الثابت بكثافة التيار وتوليد السيالة المغناطيسية وتوزعها وتوزع خطوط شدة الحقل وغيرها من محددات في المحرك موضع الدراسة . يتم حل المعادلة (14) باستخدام برنامج ANSYS وفق المخطط الانسيابي الشكل (2) [9,10,11,12]. نتبع بناءً على المخطط الانسيابي للحل الخطوات التالية :

رسم النموذج الهندسي :

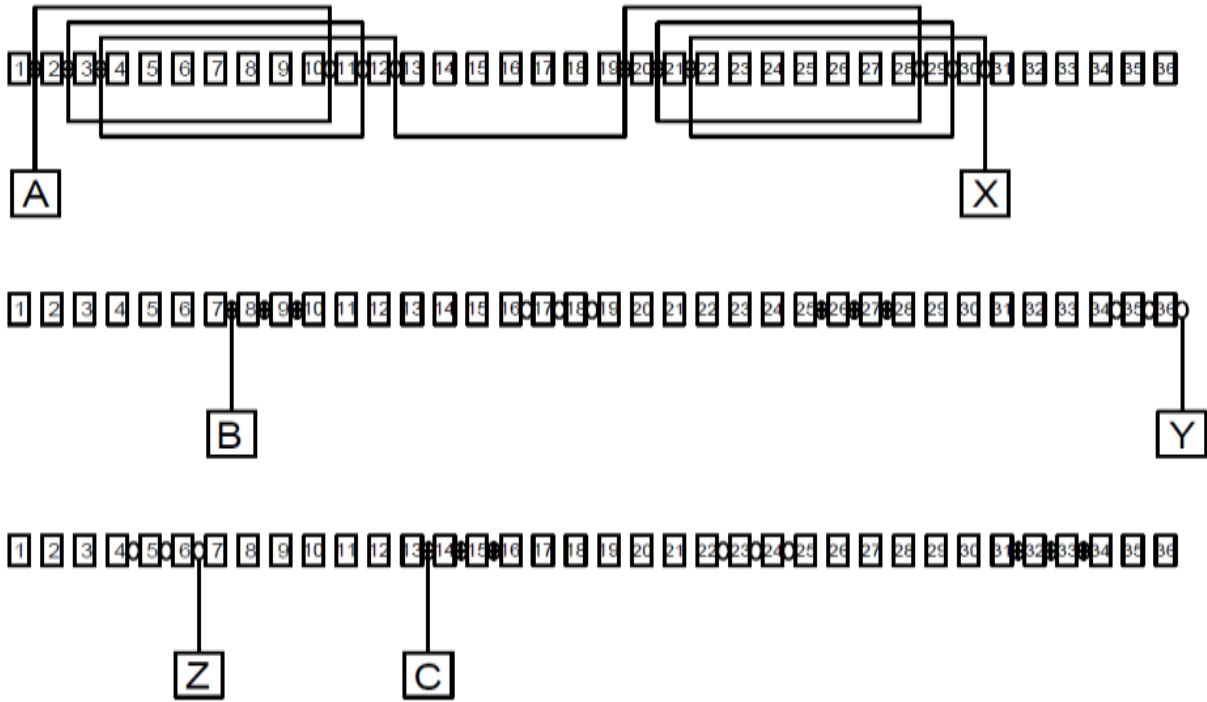
تم تنظيم الأبعاد الهندسية وخصائص الملفات للآلة المدروسة في الجدول (1) ، والجدول (2) يضم القيم الاسمية للآلة ، و الشكل (3) يوضح مخطط اللف في مجاري الجزء الثابت مبينا أنه لدينا ثلاثة مجارٍ تحت كل قطب ولكل طور .

الجدول (1) الأبعاد الهندسية وخصائص الملفات

الأبعاد الهندسية وخصائص الملفات	
0.25 ميلمتر	طول الثغرة الهوائية
105 ميلمتر	طول الصفائح
36 مجرى	عدد مجاري الثابت
نجمي	نوع التوصيل
2	عدد أزواج الأقطاب
131 ميلمتر	القطر الخارجي للثابت
84 ميلمتر	القطر الداخلي للثابت
0.96	عامل اللف
3	عدد المجاري تحت كل قطب ولكل طور
28 مجرى	عدد مجاري الدائر
83.5 ميلمتر	القطر الخارجي للدائر
30.13 ميلمتر	القطر الداخلي للدائر

الجدول (2) القيم الاسمية

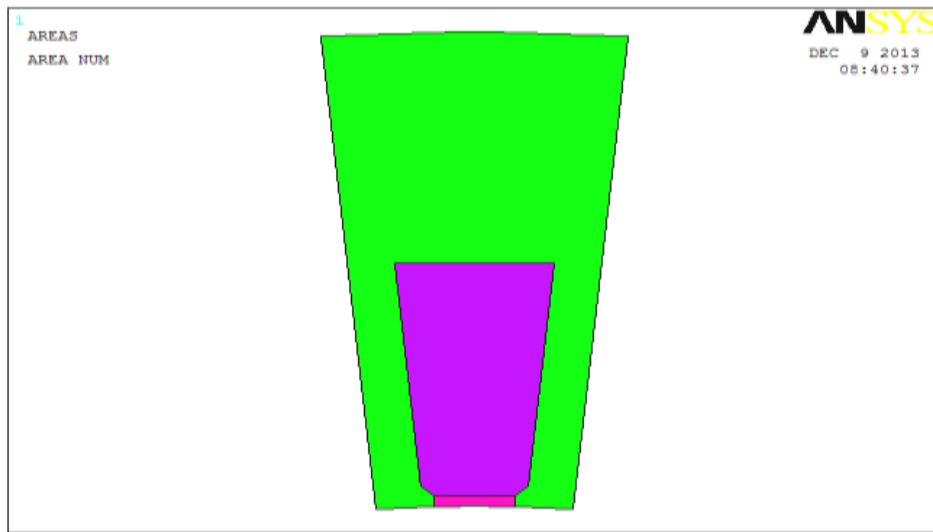
1.5 كيلو واط	الاستطاعة الفعلية
380 فولت	التوتر الاسمي
50 هرتز	التردد
1500 دورة بالدقيقة	السرعة الاسمية



الشكل (3) مخطط اللف في مجاري الجزء الثابت

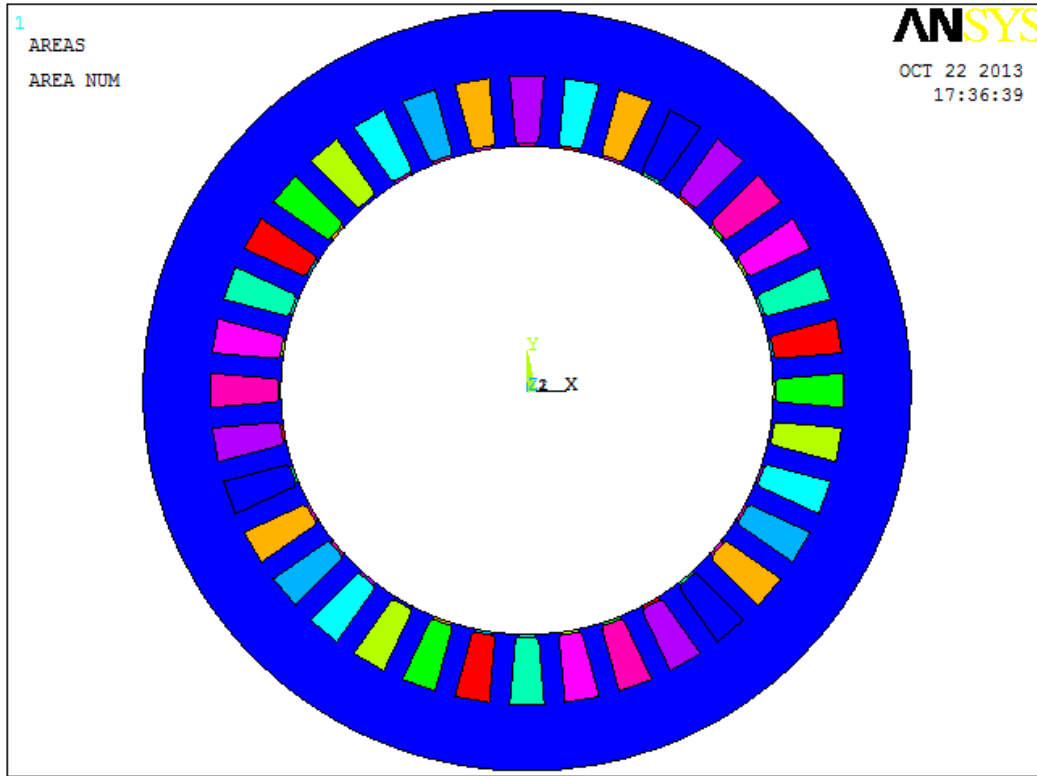
بناء الجزء الثابت construction of the stator

إن أسلوب بناء البنية الهندسية معقد باستخدام الحزمة البرمجية ANSYS. لأن الأسطح (المساحات) للمناطق المرجوة لا تبني بشكل آني كما في الخطوط التي توضع في الفراغ ، ولذلك يتم البدء بتعريف جزء واحد من البنية الهندسية للثابت المكون من 36 مجرى كما هو مبين في الجدول (1) ، ومن ثم يتم تحديد السطح الحديدي المحيط بالسماكة المأخوذة وذلك برسم القطر الخارجي للجزء الثابت، وكذلك الأمر للقطر الداخلي للثابت وبالتالي نحصل على الشكل (4):



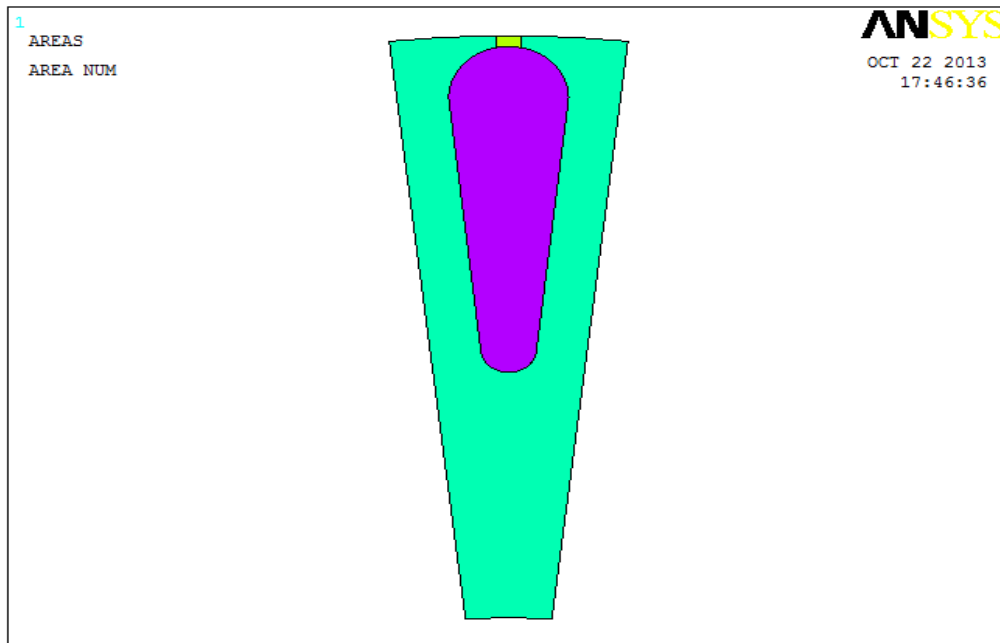
الشكل (4) إنشاء مجرى من مجاري الثابت

يتم تكرار خطوة إنشاء مجرى واحد على باقي المجاري كما هو مبين في الشكل (5) :

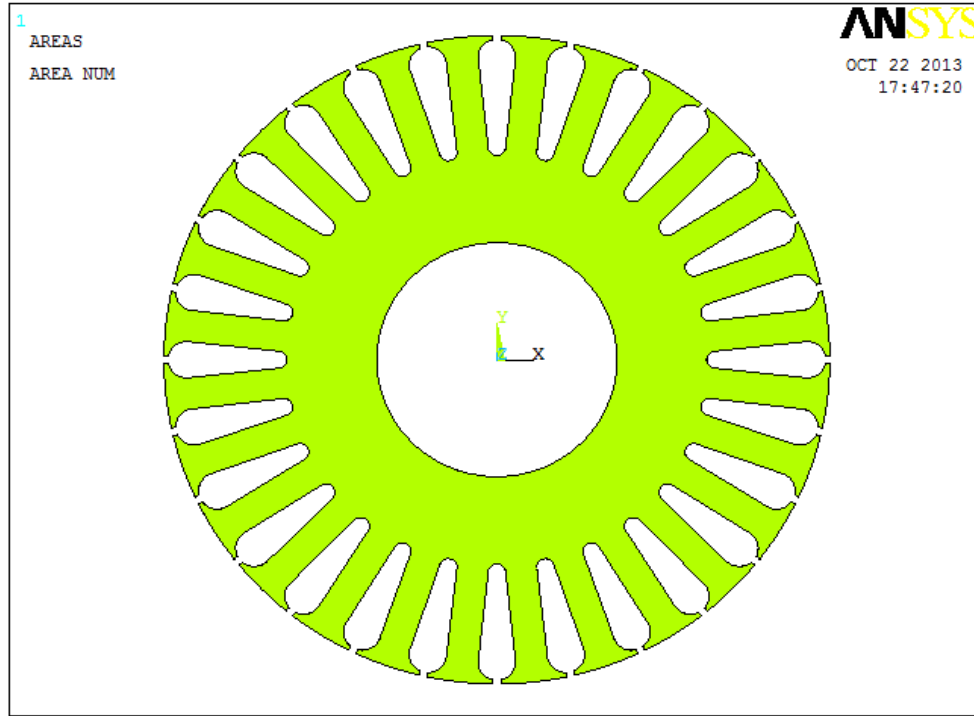


الشكل (5) الجزء الثابت كلياً وتظهر المجاري عليه

نقوم بتشكيل الجزء الدائر بطريقة مشابهة لما تم إجراؤه للجزء الثابت، مع الأخذ بالحسبان أن محيطه يحوي (28) مجرى وفق معطيات المحرك.

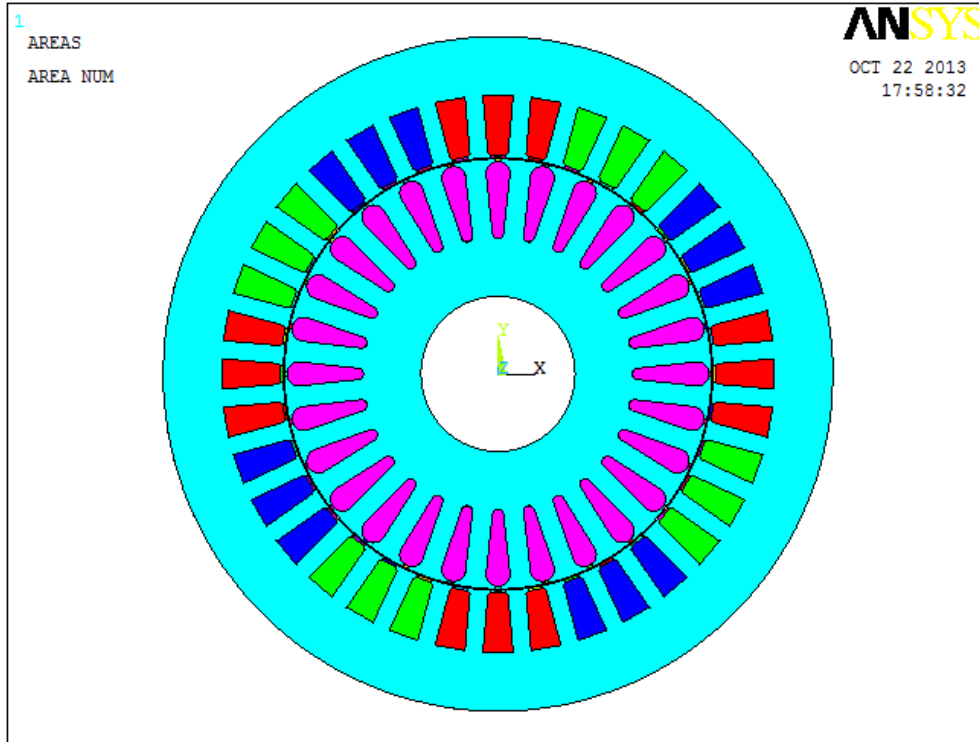


الشكل (6) يوضح قضيبي واحد للدائر



الشكل (7) البنية الهندسية الكاملة للجزء الدائر

بناء الثغرة الهوائية : بعد بناء البنية الهندسية الكاملة للجزء الدائر والبنية الهندسية الكاملة للدائر، يتم إنشاء الثغرة الهوائية بسماكة 0.25mm في الوسط، نقوم بتقسيم الثغرة الهوائية إلى قسمين متساويين سماكة كل منهما 0.125mm الجزء الأول يتبع إلى الجزء الثابت والجزء الثاني متصل إلى الدائر، والخط الفاصل ينتمي إلى جزأي الآلة الثابت والدائر .



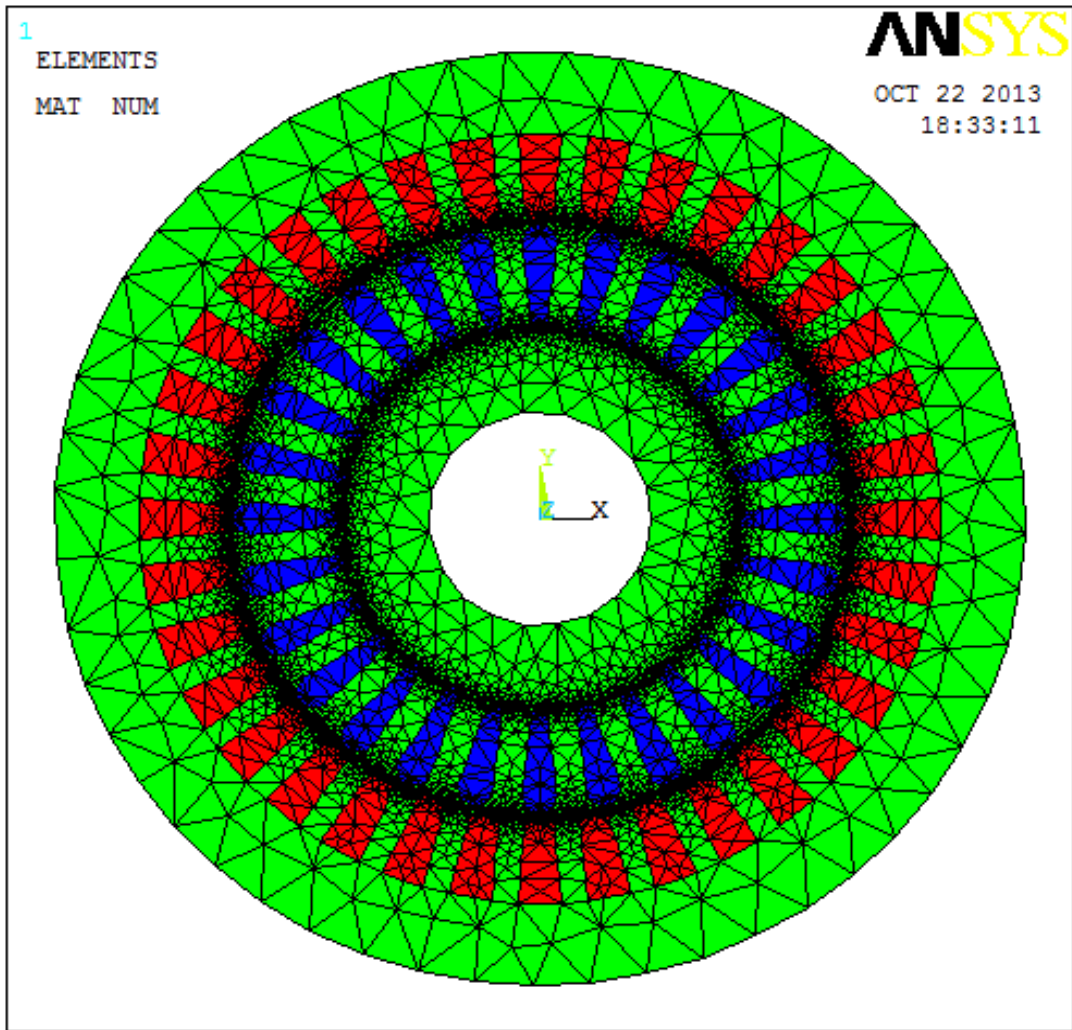
الشكل (8) البنية الهندسية الكاملة للمحرك

إدخال المعطيات

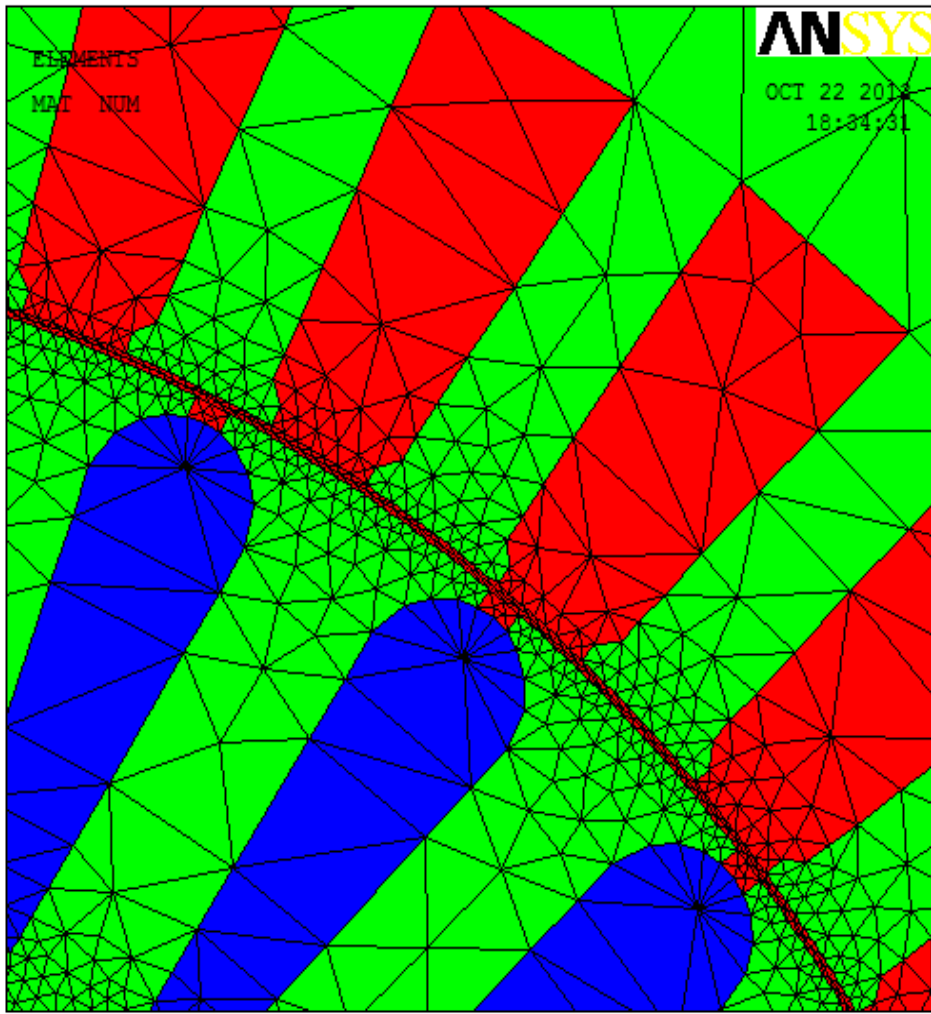
يتم تحديد نوع المادة المستخدمة لكل جزء من الآلة كما يتم تحديد العنصر المستخدم ، إذ يتم استخدام العنصر PLANE53 بخصائص AZ لمناطق الحديد والهواء، والعنصر PLANE53 يتمتع بدرجة من الحرية AZ و VOLT لمناطق قضبان الدائر ، ويتم استخدام المواد التالية: الهواء لأجل الثغرة الهوائية بنفاذية مغناطيسية مساوية الواحد، والنحاس لأجل مجاري الثابت بنفاذية مغناطيسية تساوي الواحد ومقاومة كهربائية نوعية $1.724 \times 10^{-8} \Omega.m$ عند درجة حرارة 20 درجة مئوية ، والألمنيوم لأجل منطقة مجاري الدائر و بنفاذية مغناطيسية مساوية الواحد ومقاومة كهربائية نوعية $2.826 \times 10^{-8} \Omega.m$ ، والحديد لأجل منطقة أسنان وقلب كل من الثابت والدائر و بنفاذية مغناطيسية 1000 هنري /المتر .

بناء الشبكة

يتم بناء الشبكة باستخدام الأوامر LESIZE لأجل تقسيم الخطوط ، والأمر AMESH لنحصل على شبكة العناصر المنتهية كما في الشكلين التاليين (9) و(10):



الشكل (9) شبكة العناصر المنتهية



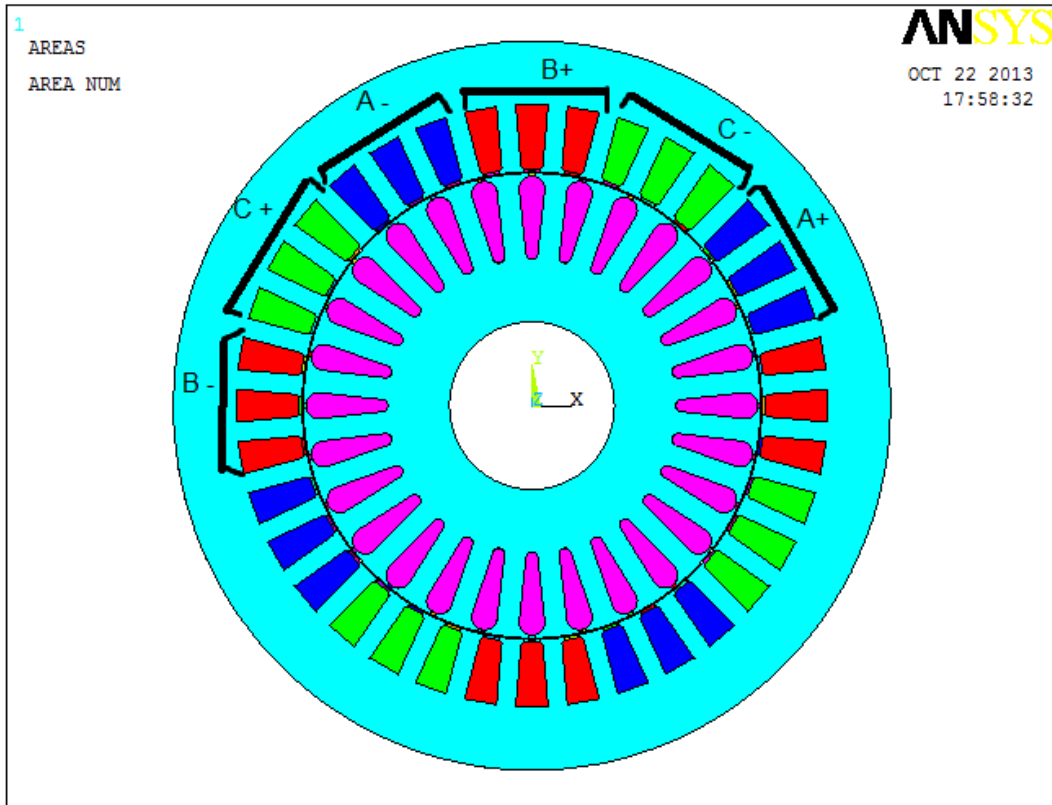
الشكل (10) تكبير الشبكة الحسابية

إدخال الشروط الحدية

يتم بوضع الشرط الحدي $AZ=0$ على القطر الخارجي للثابت والقطر الداخلي للدائر وذلك من أجل منع خطوط السيالة من التسرب إلى خارج الآلة.

إدخال كثافة التيار

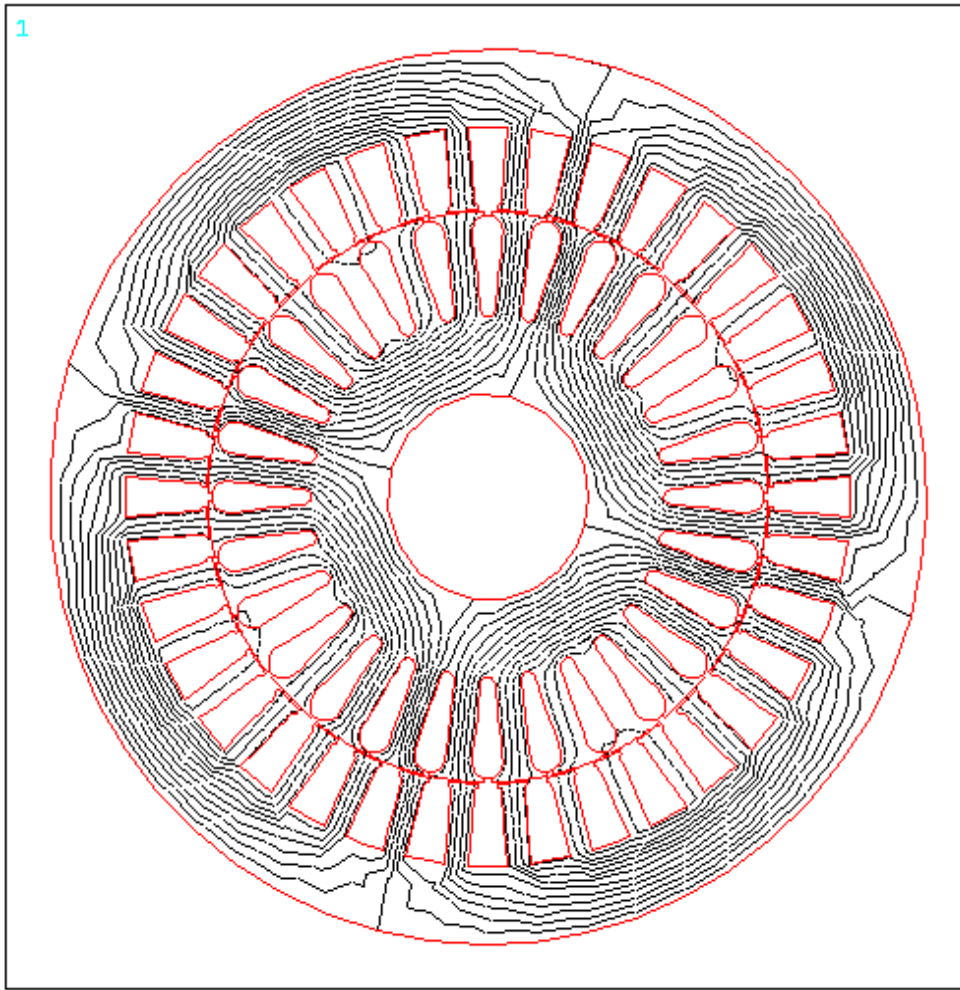
يتم تغذية أطوار المحرك A و B و C مع مراعاة وجود فرق صفحة 120 درجة بين كل طور وآخر.



الشكل (11) توزيع الأطوار الثلاثة على مجاري الثابت

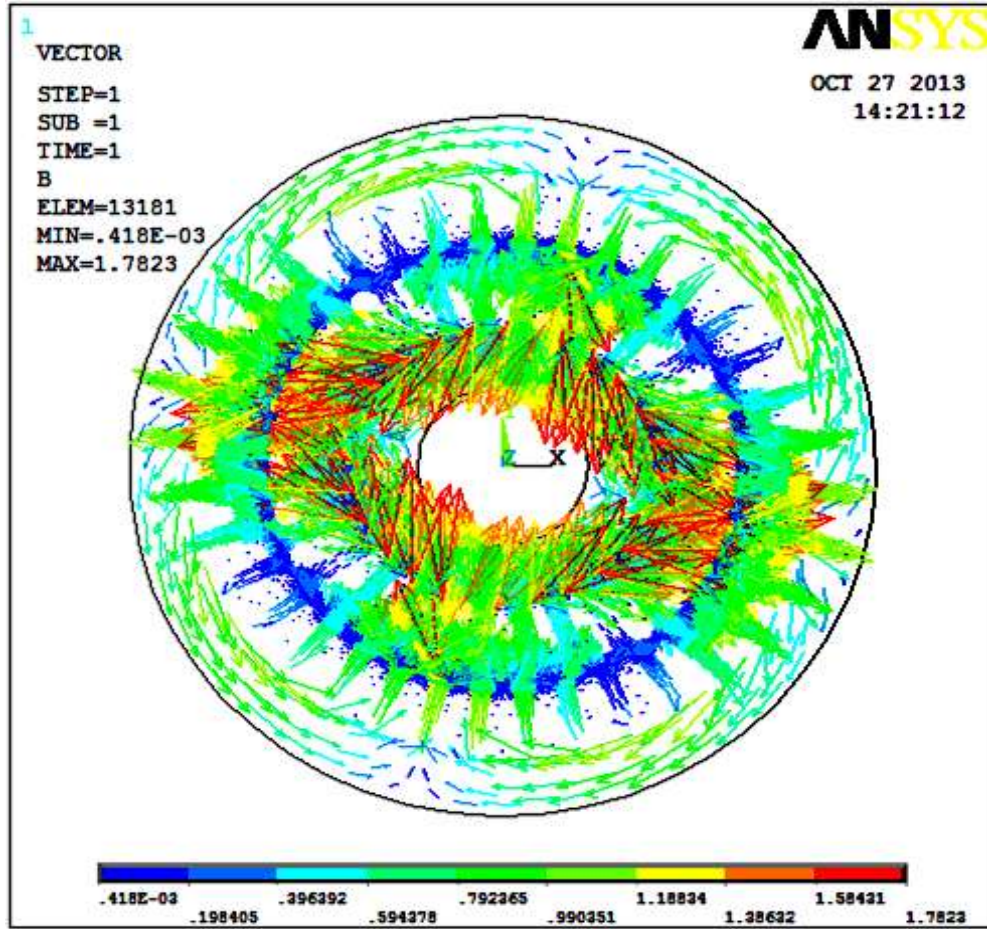
النتائج والمناقشة:

تم إدخال معطيات الآلة المدروسة عبر النوافذ التفاعلية للبرنامج ANSYS والشروط الحدية وفق النموذج المشكل للآلة . فتم الحصول على النتائج تباعاً انطلاقاً من توزيع السبالة المغناطيسية في الآلة .



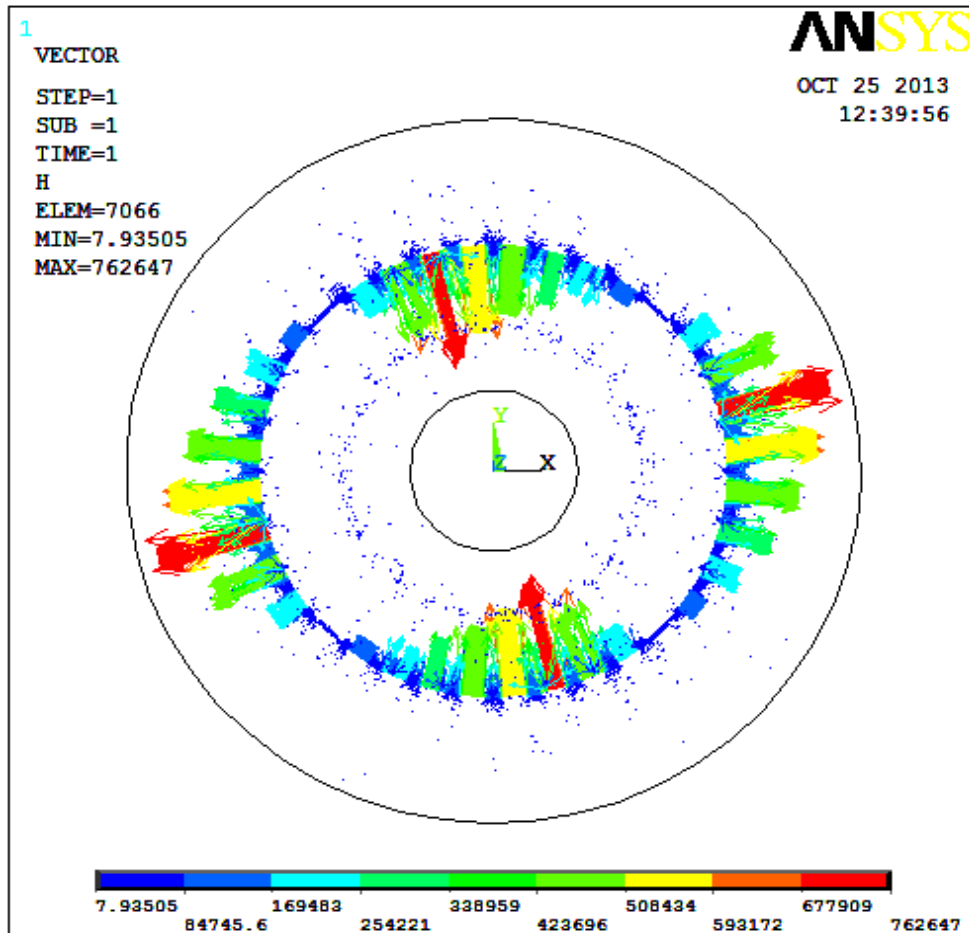
الشكل (12) توزيع السيادة المغناطيسية

يبين الشكل (12) توزيع خطوط السيادة المغناطيسية في الأجزاء المختلفة للآلة في كل من الثابت والدائر والشغرة الهوائية والأسنان والمجاري . يلاحظ تفاوت كبير لكثافة خطوط السيادة المغناطيسية في أجزاء الآلة المختلفة، وتكون أعظمية في أسنان الثابت والدائر. فإذا كانت على سبيل المثال السيادة المغناطيسية في الأسنان أكبر من القيمة المسموح فيها بالنسبة لنوع الحديد المستخدم في صناعتها يجب في هذه الحالة زيادة سطح مقطعها، أي أن البرنامج يمكننا من تعديل تصميم أجزاء الآلة حتى الوصول إلى القيم المثلى. كما يقدم مخطط توزيع السيادة المغناطيسية في الآلة لتقييم صوابية النمذجة، إذ إن خطوط الحقل المغناطيسي لدينا شكلت أربعة أقطاب كما هو مبين في الشكل (12) مما يؤكد صحة النمذجة .



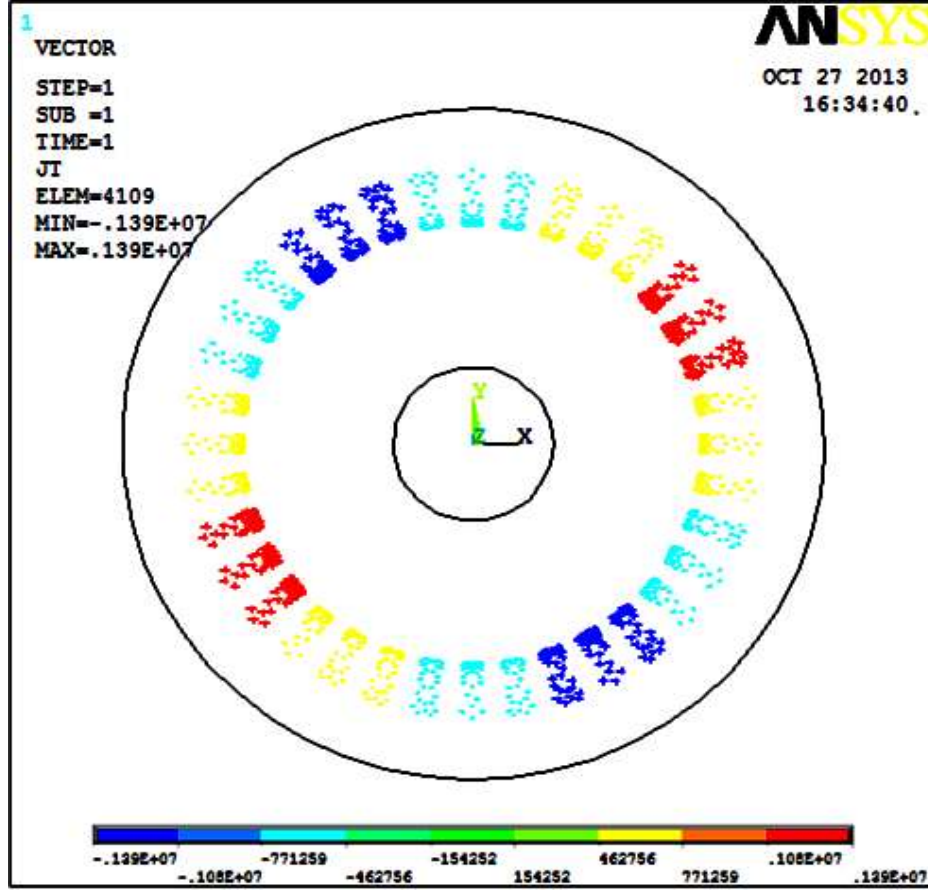
الشكل (13) توزيع كثافة السيادة المغناطيسية في أجزاء الآلة.

يبين الشكل (13) تمثيلاً لتوزيع كثافة السيادة المغناطيسية عن طريق الإظهار بالأشعة، نلاحظ منه وجود توزيع منطقي ومقبول لكثافة السيادة المغناطيسية، إذ تكون أعظمية في كل من أسنان الثابت والدائر حتى تصل إلى حوالي 1.8T وتكون أقل بقليل من هذه القيمة في كل من قلب الثابت والدائر. كما يلاحظ من الأشكال المبينة لتوزيع خطوط السيادة المغناطيسية أن السيادة التسريبيه قليلة وهذه نتيجة جيدة لأن نقصان السيادة التسريبيه يؤدي إلى زيادة السيادة الأساسية. وعند مقارنة الشكل (12) والشكل (13) نجد أن هناك تطابقاً بين توزيع خطوط السيادة المغناطيسية في الأقسام المختلفة للآلة (قلب الثابت، قلب الدائر، أسنان الثابت، والثغرة الهوائية) وهذا يؤكد دقة النتائج الحاصلة وصحتها.



الشكل (14) توزيع خطوط الحقل المغناطيسي.

يظهر الشكل (14) خطوط توزيع الحقل المغناطيسي في الثابت والدائر والثغرة الهوائية والمجاري والأسنان ، إذ يتركز الحقل بجوار الأسنان .



الشكل (15) توزيع كثافة التيار الكهربائي في ملفات الثابت

وبالنسبة لكثافة التيار في نواقل ملفات الثابت يجب أن تكون هذه الكثافة موزعة بشكل منتظم في المجرى ككل لأن ذلك يعطي نتائج دقيقة ويقلل من الضياع الناتج عن التيارات الإعصارية ومن ظاهرة انزياح التيار التي تنتج من التوزيع غير المنتظم لكثافة التيار في النواقل ، وتكون كثافة التيار أكثر في النواقل المقابلة للثغرة الهوائية ، وهذا محقق كما يبدو في الشكل (15) .

الاستنتاجات والتوصيات

- نستنتج من هذه الدراسة أن طريقة العناصر المنتهية لا تقدم الخصائص المغناطيسية للمحرك التحريضي (الفيض وكثافة الفيض والحقل المغناطيسي) فحسب، بل أيضا صورة مقابلة لتوزيع كثافة التيار في أجزاء الملفات.
- تتيح هذه الطريقة في الحصول على قيم القوى والعزوم المؤثرة في أجزاء الآلة ، كما يمكن أيضا دراسة الحالة الحرارية للآلة الكهربائية بهذه الطريقة والحصول على صورة متكاملة للتوزيع الحراري داخل الآلة وتحديد قيم درجات الحرارة في أجزائها المختلفة، الموافقة لحالات عمل المحرك التحريضي .
- يتبين من النتائج العملية للنمذجة أنه يمكن دراسة أداء الآلة التحريضية انطلاقاً من تحديد توزيع الحقول الكهرومغناطيسية في الأجزاء المختلفة منها، للحصول على التصميم الأمثل للمحرك .
- تعد طريقة العناصر المنتهية أداة فعالة لدراسة الحالة الكهربائية والمغناطيسية والحرارية للآلات والعناصر والأجهزة الكهربائية المختلفة ، كما تمكن من دراسة تأثير التيارات الإعصارية وحساب ضياعات الاستطاعة فيها .

• يمكن استخدام هذه الطريقة أيضا لدراسة الأعطال المختلفة للآلة الكهربائية كالقصر بين الملفات وغيرها .
ومما لا شك فيه أنّ هذه الدراسات يمكن توظيفها بشكل فعال في عملية تصميم الآلات الكهربائية للحصول على أفضل النماذج التصميمية فنياً واقتصادياً .

المراجع:

- 1- BOGHOS H., and Al-JAZI A., *Asynchronous (Induction) Machines* , Damascus university, 2008.
- 2- HASSAN I., *Asynchronous (Induction) Machines* ,Tishreen university,2004.
- 3-ABU SAIF A., *Design of Electrical Machines* , Damascus university, 2006.
- 4- HASSAN I., *Design of Electrical Machines*, Tishreen university,1997.
- 5-BSOU F., and Al-HASSOUN Y., *Design of Electrical Machines* ,Aleppo university, 2009.
- 6- RAO N., *Elements Of Engineering Electromagnetics*, 1st.ed., Cambridge press , Newdelhi, 2002 ,432.
- 7-SADIKU M.N , *Numerical techniques in Electromagnetics* ,2nd .ed., CRC press , New York , 2001 ,750.
- 8- PEDRO J., SADOWISKI N, and BASTOS A., *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*, 1st.ed., Marcel Dekker , Brazil, 2003 ,497.
- 9- AMEEN A H., *ANSYS Analysis Of Single Phase Induction motor*, Technical College, Baghdad,2011.
- 10- DELPERO T., LEPOITTEVIN G. , and SANCHEZ A., *Finite Element Modeling with ANSYS* , Swiss Federal Institute of Technology, Zurich,2010.
- 11- ANSYS 13., *Help of ANSYS*, ANSYS, Inc , Pennsylvania, U.S.A, 2010 .
- 12- SKALKA M., *Induction Machine 2-D Magnetic Field Model*, Faculty of Electrical Engineering and Communication ,Czech Republic,2000 .